Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-15

加工面への誤差の転写特性に基づく面品位向上技術に関する研究

西口, 直浩

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2018-03-25
(Date of Publication)
2019-03-01
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲第7187号
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007187

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏　名　西 口　直 浩

専　攻　工学研究科 博士課程後期課程機械工学専攻

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

加工面への誤差の転写特性に基づく
面品位向上技術に関する研究

指導教員　佐 藤　隆 太

本研究では，数値制御工作機械による加工の高度化技術の開発を通じて作業工数の削減を実現し，ものづくり人材不足の解消と市場ニーズに対応可能な柔軟な生産システムの構築に貢献することを目的に，数値制御工作機械により生成される加工面に発生する加工誤差の評価方法を提案するとともに，その評価結果から各誤差要素の加工面への転写特性を明らかにし，その転写特性に基づいた加工面の面品位向上技術の検討を行った．本研究により得られた結論と今後の研究課題を以下に整理する．

これらの課題の検討を進めるにあたり本研究では，数値制御工作機械における加工誤差を発生させる要因を，送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差と送り駆動系の運動特性以外に起因した加工誤差，さらに送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差を，送り方向の運動精度に起因した加工誤差と送り方向以外の運動精度に起因した加工誤差に分類し，その運動誤差の測定方法や加工面への影響を調査する加工実験方法を含む評価方法を提案した．そして，これにより明らかとなったそれぞれの関係性から，加工誤差を削減する方法を示した．とくに，本研究では運動精度に起因した加工誤差のうち加工面に大きな影響を及ぼす，回転軸の運動方向反転動作に伴う運動誤差に着目した．また，原因となる送り駆動軸系の精度向上による改善だけでなく，他の送り駆動系を用いてこれら加工誤差を削減することが可能であることも実験結果により示された．

本研究により得られた結論と今後の研究課題を各章ごとに以下に整理する．

まず第 1 章では，現在の製造業を取り巻く環境について数値制御工作機械を中心に，ものづくり人材不足への対策として加工の高度化技術の開発を通した作業工数の削減の実現と，近年多様化する市場ニーズに対応するための柔軟な生産システムの構築の必要性について述べた．そして，今後も工作機械が取り組むべき技術課題として，高精度化が選ばれる理由について説明し，これまでの 5 軸制御マシニングセンタを含む工作機械の高精度化の取り組みについてまとめることで，本研究の新規性および目的について述べた．

第 2 章では，回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法および加工試験方法を提案し，その有効性を検証するために，3 つのレーザ変位計と基準球とからなる測定装置を開発して実際に測定実験を行うとともに，実加工試験を行って加工結果と測定結果の違いについて考察した．さらに，その結果に基づいた補正方法を提案し，その有効性を実加工試験により検証した．その結果，以下に示すことが明らかとなった．

(1) 二つの回転軸を組み合わせて動作させることで，回転軸の運動方向反転時の挙動を直進軸の挙動と分けて測定できる．
(2) 提案した測定方法と同じ運動でボールエンドミル加工を行うと，回転軸の運動方向反転時の挙動が加工面に転写され，加工結果から回転軸の運動方向反転時の挙動を評価できる．

(3) 測定結果と同様の運動で加工を行うと，回転軸の接線方向の動的精度と加工面との位置関係により測定結果とは異なる形状が得られる．
(4) 加工面に対して凸形状となる軌跡誤差は，工具径との関係により加工面には転写されにくい．
(5) 凸形状の軌跡誤差がもつ上記特性を用いることで，軌跡誤差が加工面に及ぼす影響を軽減することが可能である．

実際の同時 5 軸加工における加工面不良に関しても，本研究で判明した要因が大きく関与していると考えられる．本研究で提案した方法により，運動方向反転時における送り駆動系の運動特性による加工誤差の軽減が期待されるが，これに必要な補正量を求めるには，工具経路，工具径，工具と被削材の位置関係，被削材の形状といった，様々な情報を必要としており，現在 NC 装置に引き渡されている情報だけでこれを求めることができない．このことから今後，NC 装置と CAD や CAM といった周辺機器との情報共有についても，継続した調査と研究を進める予定である．

第 3 章では，回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向変位に着目し，その挙動を評価するための測定方法と，軸方向変位が加工面にどのような影響を及ぼすのか評価するための加工試験を提案し，実際の 5 軸制御マシニングセンタの傾斜軸に適用して測定と加工試験とを行った．さらに，加工精度を向上させるための一つの方法として，軸方向変位の測定結果に基づいて直進軸の運動を補正することで軸方向変位による影響を補正する方法についても検討し，実験によりその有効性を検証した．その結果，以下に示すことが明らかとなった．

(1) ウォームギヤ駆動の回転軸では，回転軸の運動方向反転時には軸方向変位が生じる場合があり，その軸方向変位は加工結果に影響を及ぼしている．
(2) 評価対象の回転軸とほかの直進軸または回転軸の同期運動による加工方法により，回転軸の軸方向変位による影響を的確に評価できる．
(3) 回転軸の軸方向変位による影響は，回転軸と平行な軸を用いて補正が可能であり，補正により加工精度を向上できる．

実際の 5 軸制御加工においても，回転軸の運動方向反転時に生じる軸方向変位は発生し，加工結果に影響を及ぼしていると考えられる．本研究で提案した評価方法と補正方法により，5 軸制御加工精度を向上できると期待される．A 軸のうえにのった C 軸についても運動方向の反転による軸方向の変位が生じていると考えられ，その場合には A 軸の回転角度により C 軸回転中心の向きが変化するため，複数の直進軸による補正が必要になる．今後，そのような場合についての補正方法も検討するほか，軸方向以外の変位についても，測定方法と補正方法を検討する予定である．

第 4 章では，工具が加工面へアプローチする状況の中でも，加工の中断により工具を加工面から一旦離した後に同一箇所へアプローチした場合の加工面に着目し，工具経路と加工面に生じる工具アプローチ痕との関係を調査した．さらに，凹形状に発生する工具アプローチ痕を低減する方法として，工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置をオフセットさせることにより，意図的に凸形状の工具経路を発生させることで凹形状の誤差を相殺する方法を採用し，その補正に必要なオフセット量を計算式より算出する方法を提案し，実験によりその有効性を検証した．その結果，以下に示すことが明らかとなった．

(1) アプローチ半径の違いによる加工痕への影響についてみると，アプローチ半径が小さくなるにつれより急峻な加工痕が発生するが，加工痕の深さへの影響はない．
(2) 工具抜け部とアプローチ部の加工面形状の差は，工具半径方向の切込み量の変化率の違いによって生じる工具変形量と工具半径方向の切込み量との関係によって決まる．
(3) 工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置を，オフセットさせることでアプローチ痕を補正でき，提案した方法によってオフセット量を計算できる．

実際のボールエンドミルを用いた加工においても，工具アプローチ痕が発生することで，加工面品位に悪影響を及ぼしていると考えられる．本研究で提案した方法により，補正に必要なオフセット量を求めることができ，工具アプローチ痕の軽減が期待されるが，工具アプローチ痕を完全になくすには至っていない．工具アプローチ痕の発生には，工具の種類や突出し量，被削材の種類や形状といった，様々な条件が影響することが考えられることから，今後も継続した調査と補正方法の検討を進める予定である．

最後に第 5 章では，これら各章の結果より得られた結論を整理するとともに，今後の研究課題について以下のように述べた．
各章で得られた結果より，これら複数の加工誤差要因を持つ工作機械の高精度化を機械的改善方法だけではなく，制御面から改善できることを示すことで，工作機械の高精度化に新たな進展をもたらすとともに，さらには生産システムにおける生産性の向上・工数削減に貢献できると考えられる．しかし，本研究で提案した補正方法の補正量を求めるには，その多くが工具経路，工具径，工具と被削材の位置関係，被削材の形状といった様々な情報を必要としており，いまだ他の要素との関係性の調査が完了していないことから，さらなる調査と判明した関係性を用いた補正機能を開発する必要がある．また，これらデータを NC 装置や CAD，CAM といった周辺機器と共有する必要があることから，これら情報の共有方法についても，IoT といった新しい技術に関する継続した調査と研究を進める予定である．

（別紙１）　　　　　　　　　論文審査の結果の要旨

氏名	西口　直浩	
論文題目	加工面への誤差の転写特性に基づく面品位向上技術に関する研究	

審査委員 区分	職名	氏名
主査	准教授	佐藤　隆太
副査	教授	田浦　俊春
副査	教授	白瀬　敬一
副査	教授	向井　敏司
副査		

要　旨

本論文では，数値制御工作機械による加工の高度化技術の開発を通じて作業工数の削減を実現し，ものづくり人材不足の解消と市場ニーズに対応可能な柔軟な生産システムの構築に貢献することを目的に，数値制御工作機械により創成される加工面に発生する加工誤差の評価方法を提案するとともに，その評価結果から原因を明らかにし，この加工誤差を削減する方法の検討をしている．

これらの課題の検討を進めるにあたり，本論文では，数値制御工作機械における加工誤差を発生させる要因を，送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差と送り駆動系の運動特性以外に起因した加工誤差，さらに送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差を，送り方向の運動精度に起因した加工誤差と送り方向以外の運動精度に起因した加工誤差に分類し，その運動誤差の測定方法や加工面への影響を調査する加工実験方法を含む評価方法を提案している．そして，これにより明らかとなったそれぞれの関係性から，加工誤差を削減する方法を示している．とくに，本研究では運動精度に起因した加工誤差のうち加工面に大きな影響を及ぼす，回転軸の運動方向反転動作に伴う運動誤差に着目しており，また，原因となる送り駆動軸系の精度向上による改善だけでなく，他の送り駆動系を用いてこれら加工誤差を削減することが可能であることも実験結果により示している．本論文において得られている結論は以下の通りである．

第１章では，現在の製造業を取り巻く環境について数値制御工作機械を中心に，ものづくり人材不足への対策として加工の高度化技術の開発を通した作業工数の削減の実現と，近年多様化する市場ニーズに対応するための柔軟な生産システムの構築の必要性について述べられている．そして，今後も工作機械が取り組むべき技術課題として，高精度化が選ばれる理由について説明し，これまでの５軸制御マシニングセンタを含む工作機械の高精度化の取り組みについてまとめることで，本研究の新規性および目的について述べている．

第２章では，回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法および加工試験方法を提案し，その有効性を検証するために，３つのレーザ変位計と基準球とからなる測定装置を開発して実際に測定実験を行うとともに，実加工試験を行って加工結果と測定結果の違いについて考察している．さらに，その結果に基づいた補正方法を提案し，その有効性を実加工試験により検証した．その結果，以下に示すことを明らかにしている．

(1) 二つの回転軸を組み合わせて動作させることで，回転軸の運動方向反転時の挙動を直進軸の挙動と分けて測定できる．

(2) 提案した測定方法と同じ運動でボールエンドミル加工を行うと，回転軸の運動方向反転時の挙動が加工面に転写され，加工結果から回転軸の運動方向反転時の挙動を評価できる．

(3) 測定結果と同様の運動で加工を行うと，回転軸の運動誤差の方向と加工面の方向との関係により測定結果とは異なる形状が得られる．

(4) 加工面に対して凸形状となる軌跡誤差は，工具径との関係により加工面には転写されにくい．

(5) 凸形状の軌跡誤差がもつ上記特性を用いることで，軌跡誤差が加工面に及ぼす影響を軽減することが可能である．

実際の同時５軸加工における加工面不良に関しても，本論文で示された要因が大きく関与していると考えられ，本論文で提案された方法により，運動方向反転時における送り駆動系の運動特性による加工誤差の軽減が期待される．しかし，これに必要な補正量を求めるには，工具経路，工具径，工具と被削材の位置関係，被削材の形状といった，様々な情報を必要とされており，現在NC装置に引き渡されている情報だけでこれを求めることができないことも述べられている．

氏名	西口　直浩

第３章では，回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向変位に着目し，その挙動を評価するための測定方法と，軸方向変位が加工面にどのような影響を及ぼすのか評価するための加工試験を提案し，実際の５軸制御マシニングセンタの傾斜軸に適用して測定と加工試験とを行っている．さらに，加工精度を向上させるための一つの方法として，軸方向変位の測定結果に基づいて直進軸の運動を補正することで軸方向変位による影響を補正する方法についても検討し，実験によりその有効性を検証している．その結果，以下に示すことが明らかになっている．

(1) ウォームギヤ駆動の回転軸では，回転軸の運動方向反転時には軸方向変位が生じる場合があり，その軸方向変位は加工結果に影響を及ぼしている．

(2) 評価対象の回転軸とほかの直進軸または回転軸の同期運動による加工方法により，回転軸の軸方向変位による影響を的確に評価できる．

(3) 回転軸の軸方向変位による影響は，回転軸と平行な軸を用いて補正が可能であり，補正により加工精度を向上できる．

実際の５軸制御加工においても，回転軸の運動方向反転時に生じる軸方向変位は発生し，加工結果に影響を及ぼしていると考えられる．本論文で提案した評価方法と補正方法により，５軸制御加工精度を向上できると期待される．A軸のうえにのったC軸についても運動方向の反転による軸方向の変位が生じていると考えられ，その場合にはA軸の回転角度によりC軸回転中心の向きが変化するため，複数の直進軸による補正が必要になる．今後，そのような場合についての補正方法も検討するほか，軸方向以外の変位についても，測定方法と補正方法を検討することが計画されている．

第４章では，工具が加工面へアプローチする状況の中でも，加工の中断により工具を加工面から一旦離した後に同一箇所へアプローチした場合の加工面に着目し，工具経路と加工面に生じる工具アプローチ痕との関係が調査されている．さらに，凹形状に発生する工具アプローチ痕を低減する方法として，工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置をオフセットさせることにより，意図的に凸形状の工具経路を発生させることで凹形状の誤差を相殺する方法を採用し，その補正に必要なオフセット量を計算式より算出する方法を提案し，実験によりその有効性を検証している．その結果，以下に示すことが明にされている．

(1) アプローチ半径の違いによる加工痕への影響についてみると，アプローチ半径が小さくなるにつれより急峻な加工痕が発生するが，加工痕の深さへの影響はない．

(2) 工具抜け部とアプローチ部の加工面形状の差は，工具半径方向の切込み量の変化率の違いによって生じる工具変形量と工具半径方向の切込み量との関係によって決まる．

(3) 工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置を，オフセットさせることでアプローチ痕を補正でき，提案した方法によってオフセット量を計算できる．

実際のボールエンドミルを用いた加工においても，工具アプローチ痕が発生することで，加工面品位に悪影響を及ぼしていると考えられる．本論文で提案された方法により，補正に必要なオフセット量を求めることができ，工具アプローチ痕の軽減が期待されるが，工具アプローチ痕を完全になくすには至っていない．工具アプローチ痕の発生には，工具の種類や突出し量，被削材の種類や形状といった，様々な条件が影響することが考えられることから，今後も継続した調査と補正方法の検討を進める予定となっている．

最後に第５章では，これら各章の結果より得られた結論を整理するとともに，今後の研究課題について以下のように述べられている．

各章で得られた結果より，これら複数の加工誤差要因を持つ工作機械の高精度化を機械的改善方法だけではなく，制御面から改善できることを示すことで，工作機械の高精度化に新たな進展をもたらすとともに，さらには生産システムにおける生産性の向上・工数削減に貢献できると考えられる．しかし，本論文で提案された補正方法の補正量を求めるためには，その多くにおいて，工具経路，工具径，工具と被削材の位置関係，被削材の形状といった様々な情報を必要としており，いまだ他の要素との関係性の調査が完了していないことから，さらなる調査と判明した関係性を用いた補正機能を開発する必要がある．また，これらデータをNC装置やCAD，CAMといった周辺機器と共有する必要があることから，これら情報の共有方法についても，IoTといった新しい技術に関する継続した調査と研究を進める予定となっている．

本研究は，数値制御工作機械による加工技術の高度化について，工作機械の運動誤差とその加工面への転写特性に基づく面品位向上方法を実験と解析の両面から研究したものであり，工作機械の運動誤差の加工面への転写特性とそれに基づく加工面の高品位化について重要な知見を得たものとして価値ある業績である．

提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており，学位申請者の 西口直浩 は，博士（工学）の学位を得る資格があると認める．